

Capítulo V:

Análisis fisicoquímicos en la implementación del proceso de potabilización y control de calidad de agua de pozo

.....

Guillermo Garzón García
Universidad Santiago de Cali
0000-0001-8684-3911

Diana Marcela Burbano Banguero
Universidad Santiago de Cali
0000-0003-3796-6936

Jorge Humberto Carabali Yepes
Universidad Santiago de Cali
0000-0002-4224-8659

Capítulo V:

Análisis fisicoquímicos en la implementación del proceso de potabilización y control de calidad de agua de pozo

Guillermo Garzón García
Diana Marcela Burbano Banguero
Jorge Humberto Carabali Yepes

Resume: *Se presentan resultados fisicoquímicos como seguimiento de la implementación en la dosificación de reactivos químicos (sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio, “coagulantes”, hipoclorito de calcio, poliacrilamida aniónica “floculante” y cal apagada) en una planta de tratamiento de agua de pozo. Los valores óptimos de dosificación fueron obtenidos mediante pruebas de jarras en el proceso de clarificación. Se hizo seguimiento de la implementación de los controles de calidad de agua durante 24 meses, procedimientos como limpieza, saneamiento y mantenimiento de bombas, tanques y equipos fueron considerados. Alcances relacionados con el mejoramiento en un 88.46% de la calidad de agua de pozo fueron observados, con disminución de costos de operación en un 38.89% y en la disminución el impacto ambiental al bajar los desperdicios de agua de 13.000 m³ a 2.700 m³ por mes.*

Palabras claves: potabilización, sólidos disueltos, coagulantes, floculantes, pH

Abstract: *Physicochemical results are presented as follow-up of the implementation in the dosage of chemical reagents (aluminum sulfate and aluminum hydroxychloride, “coagulants”, calcium hypochlorite, “floculant” anionic polyacrylamide and slaked lime) in a well water treatment plant. The optimal dosage values were obtained by jar tests in the clarification process. The implementation of water quality controls was monitored for 24 months, procedures*

such as cleaning, sanitation and maintenance of pumps, tanks and equipment were considered. Scope related to the improvement in 88.46% of the quality of well water was observed, with decrease in operating costs by 38.89% and the decrease in environmental impact by lowering water waste from 13,000 m³ to 2700 m³ per month.

Key words: purification, dissolved solids, coagulants, flocculants, pH

5.1 Introducción

El agua es un bien ampliamente utilizado para distintos usos que dependen de sus características fisicoquímicas [1]. Distintas directivas tales como la Superintendencia de Servicios Públicos, la CRC, Salud Pública, entre otros, regulan a través de requisitos mínimos la calidad del agua según la aplicación a dársele [2].

Entre las fuentes hídricas se encuentra el agua de pozo, la cual contienen grandes cantidades de gases y minerales disueltos tales como calcio, hierro, magnesio, potasio, sodio, sulfatos; y microorganismos [3]. La utilización de agua de pozo hace necesaria una profunda caracterización; entre los parámetros fisicoquímicos se cuenta: hierro, dureza, alcalinidad, pH, turbidez, color, etc. y microbiológicos: hongos, levaduras y bacterias [4].

En municipios pequeños y/o centros empresariales es común la utilización de plantas de agua cuyo insumo principal son aguas extraídas, mediante sistemas de bombeo, de pozos profundos, que pasan a un tanque de sedimentación donde se clarifica adicionando reactivos químicos (coagulantes, cloro, floculante y cal apagada). Posteriormente, es sometida a un proceso de filtración y refinamiento para detener sustancias en suspensión para posteriormente ser enviada a la línea de distribución [5].

Datos históricos de una planta de tratamiento de agua suministrada por pozo subterráneo de muestras respaldo sin sedimentación de 5.82 % y un promedio de muestras respaldo con sedimentación de 94.18 %; fueron objeto de inquietud dada su influencia para la salud de las personas que utilizaban el recurso hídrico, siendo esta situación preocupante para la empresa prestadora del servicio de agua [6].

El Paraíso en la ciudad de Santander de Quilichao, Departamento del Cauca; cuenta con un sistema de bombeo con el cual se extrae el agua de un pozo subterráneo que se encuentra a un kilómetro y medio de la planta con una profundidad de 140 m y la conduce por una tubería de ocho pulgadas a un tanque de sedimentación; aquí se hace el proceso de clarificación, adicionando los reactivos químicos necesarios para este proceso (coagulantes, cloro, floculante y cal apagada). El agua pasa por un proceso de filtración y refinamiento

para detener sustancias en suspensión y posteriormente ser enviada a la línea de distribución [5].

El estudio planteado, busca el mejoramiento para la disminución de la cantidad de sedimentos en las muestras respaldo a un 30%; para ello se propone elaborar un diseño definitivo del pozo, análisis del posible rendimiento de las capas acuíferas perforadas, con base en los valores de los parámetros eléctricos medidos en el registro, la descripción litológica y la información hidráulica suministrada por el pozo y por los conceptos técnicos de la CRC. En el proceso de tratamiento del agua, aplicar sistemas validados de determinación fisicoquímicas en aguas para verificar la calidad de la implementación del proceso de potabilización y control de la calidad de una planta de tratamiento de agua de pozo profundo al realizar las pruebas de tratabilidad necesarias para establecer la dosis óptima de reactivos químicos que se emplearán para el tratamiento; acelerar el proceso de sedimentación en la clarificación del agua del pozo; rediseñar el proceso de tratamiento del agua cruda y mejorar los sistemas de filtración. El seguimiento de la calidad del agua se verificó bajo el cumplimiento de los requisitos establecidos por la Superintendencia de Servicios Públicos, la CRC, la CRA, Salud Pública Municipal y principalmente con la Resolución No.0549 de 2017 del Ministerio de Salud y Protección Social Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [7].

5.2 Generalidades del tratamiento de aguas

5.2.1 Tratamiento químico

Las aguas provenientes de fuentes subterráneas profundas, galerías filtrantes o manantiales pueden ser entregadas directamente al consumo, siempre que sean químicamente apropiadas y se tengan en cuenta todas las previsiones necesarias en su captación para evitar su contaminación. Cuando el agua no es naturalmente potable habrá que hacer un tratamiento corrector o potabilizador; químico, físico y microbiológico [8]. El tratamiento químico corrector se refiere al ajuste del pH del agua, a la oxidación del hierro y a la eliminación de elementos nocivos, buscando la mejor calidad del agua. La eliminación de elementos nocivos puede referirse a bajar los contenidos excesivos de hierro, manganeso, fosfatos, nitritos, cloruros o sulfatos [9].

Coagulación y Floculación

Los procesos de coagulación y de floculación se emplean para extraer del agua los sólidos que en ella se encuentran suspendidos siempre que su rapidez natural de precipitación sea demasiado baja para proporcionar clarificación efectiva. El agua cruda contiene material suspendido, tanto sólidos que pueden sedimentarse, como partículas lo bastante grandes que se precipitan en reposo, o sólidos dispersados que no se asentarán con facilidad. Una parte considerable de estos sólidos que no se asientan pueden ser coloides. La coagulación desestabiliza estos coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados [10].

Las especies coloidales halladas en agua cruda, incluyen arcillas, sílice, hierro, y otros metales pesados, color y sólidos orgánicos como los residuos de organismos muertos. Puede ser que el flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. El alumbre, las sales de hierro y polímeros de peso molecular alto son floculantes comunes. Históricamente, los coagulantes metálicos (el alumbre y las sales de hierro) han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes y floculantes, a la vez los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del intervalo adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse el hierro y el aluminio y generar problemas al usuario del agua [11].

Precipitación

El proceso de precipitación emplea el producto de solubilidad de un compuesto que contiene un ión o radical que es considerado perjudicial y que en consecuencia, debe ser eliminado antes de que el agua pueda ser usada. Uno de los principios fundamentales de la precipitación es que aumenta el tamaño del precipitado si la reacción química se lleva a cabo en presencia de partículas previamente precipitadas. El ablandamiento con cal, –el proceso de precipitación usado con mayor frecuencia–, es adecuado para ilustrar la importancia de las cuatro variables claves en la precipitación: (1) solubilidad, (2) carga de la partícula, (3) temperatura y (4) tiempo. El ablandamiento

con cal es la reducción de la dureza por la adición de cal hidratada al agua para precipitar CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, o ambos [12].

También pueden usarse otros compuestos hidróxidos (NaOH , KOH), pero de ordinario no compiten con el bajo costo de la cal. La mayor parte de las reacciones de ablandamiento se llevan a cabo a un pH alrededor de 10. Para este valor del pH, el CaCO_3 porta de ordinario una carga negativa y el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ una carga positiva. Si no se neutralizan estas cargas, la dureza del coloide puede resistir a la floculación y pasarse al efluente. Será necesario el empleo de coagulantes catiónicos cuando el grueso del precipitado es CaCO_3 cargado negativamente, como es el caso del ablandamiento parcial con cal [13].

Eliminación de los Metales pesados

De ordinario los metales pesados son eliminados del agua por precipitación, aunque también se emplea intercambio iónico y adsorción. El hierro es un ejemplo típico de un metal pesado que debe eliminarse, puesto que es un constituyente común del agua de pozo y debe ser eliminado de los abastecimientos potables. Puesto que los hidróxidos de los metales pesados son de ordinario insolubles, es común usar cal para precipitarlos. Un factor de importancia en la precipitación de metales pesados es el estado de oxidación del metal en el agua. Por ejemplo, el hierro ferroso es mucho más soluble que el hierro férrico. Por esto, tratar el agua con un oxidante como cloro o permanganato de potasio para convertir hierro ferroso al férrico es una parte esencial en el proceso de eliminación del hierro [14].

5.2.2 Tratamiento Físico

La separación de sólidos/líquidos en el tratamiento de aguas incluye los procesos para remover los sólidos suspendidos en el agua mediante sedimentación y filtrado. Los sólidos suspendidos son los capturados mediante filtración. La sedimentación es la eliminación de sólidos suspendidos en el agua por asentamiento gravitacional. La flotación también es un proceso de separación mediante la gravedad. En la clarificación, el objetivo principal de la sedimentación es la obtención de agua sin partículas en el efluente más que una corriente subálvea de lodo denso. La filtración en medio granular es, por lo general, aplicable en la eliminación de sólidos suspendidos en el intervalo de 5 a 50 mg/L cuando se desea un efluente menor que 1 U.T.J. La eliminación de

sólidos por filtración incluye varios mecanismos, algunos de carácter físico y otros de carácter químico. Estos mecanismos incluyen la adsorción y el colado [11], [12].

5.2.3 Parámetros fisicoquímicos del agua

Para examinar el aspecto físico general de una muestra, conviene recurrir a términos que describan brevemente sus características más apreciables. Estos términos pueden referirse entre otras cosas, a la presencia de color, turbidez, olor, sabor, alcalinidad, dureza, sólidos en suspensión, sedimentos, materiales flotables o partículas similares detectables a simple vista [15].

El color del agua puede estar condicionado por la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), de humus y turbas, de plancton, de restos vegetales y de residuos industriales. Tal coloración se elimina para adaptar un agua a usos generales e industriales. El método de comparación visual es aplicable a casi todas las muestras de agua potable. La polución por algunos residuos industriales suele producir colores poco habituales que no pueden equipararse. En este caso debe utilizarse un método instrumental [16].

La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton, y otros microorganismos. La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra [17].

El olor como el gusto depende del contacto de una sustancia estimulante con la adecuada célula receptora. Los estímulos son de naturaleza química, y por ello se suele decir que el olfato y el gusto son sentidos químicos. Muchas sustancias orgánicas y algunas inorgánicas influyen en el gusto y el olor. El dispositivo supremo para la realización de pruebas de olor es la nariz humana. Las pruebas de olor se llevan a cabo para proporcionar descripciones cualitativas y medidas cuantitativas aproximadas de la intensidad del olor [18].

El gusto define solamente las sensaciones gustativas que se designan como amargas, saladas, ácidas y dulces, resultantes de la estimulación

química de las terminaciones nerviosas sensitivas de las papilas de la lengua y del paladar blando. El sabor abarca un complejo de sensaciones olfativas, gustativas y táctiles, originadas por el estímulo de terminaciones nerviosas situadas en la lengua y en las cavidades nasal y bucal. En el caso del agua se hace análisis del sabor asociado con la composición y exceso de cloro residual [19]. La concentración de metales o dureza cálcica pueden generar sabores particulares de rechazo para el consumidor. Este parámetro organoléptico es evaluado normalmente por peritos en la planta de tratamiento.

La alcalinidad del agua es la capacidad para neutralizar ácidos y constituye la suma de todas las bases titulables. La alcalinidad de muchas aguas depende primordialmente del contenido en carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, por lo que suele tomarse como una indicación de la concentración de estos componentes [20]

La dureza del agua está condicionada por el contenido de sales de metales alcalinotérreos, calcio, magnesio, estroncio y bario, los dos últimos en trazas. La dureza oscila entre cero y cientos de miligramos por litro, dependiendo de la fuente y del tratamiento a que el agua haya sido sometida [21]

Sólidos son los materiales suspendidos o disueltos en aguas limpias o residuales. Los sólidos pueden afectar negativamente la calidad del agua o su suministro de varias maneras. Para las aguas potables es deseable un límite de 500 mg/L de sólidos disueltos [13].

Algunas aguas subterráneas pueden contener una cantidad de hierro bastante alta. En condiciones reductoras, el hierro existe en estado ferroso. En ausencia de iones que forman complejos, el hierro férrico no es significativamente soluble a menos que el pH sea muy bajo. Al exponerlo al aire o al añadir oxidantes, el hierro ferroso se oxida al estado férrico y puede hidrolizarse para formar óxido férrico hidratado insoluble [22].

La cloración del agua para suministro y residual, sirve principalmente para destruir o desactivar los microorganismos causantes de enfermedades; el cloro presente en el agua se aglutina con las bacterias, dejando solo una parte de la cantidad original (cloro libre) para continuar su acción desinfectante [23].

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Prácticamente todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH [24].

5.2. Metodología

5.2.1. Muestras

Las muestras de agua fueron tomadas de la planta de tratamiento de agua potable de El Paraíso, al norte del departamento del Cauca, que se abastece de un pozo subterráneo ubicado en la manzana H en la zona industrial El Paraíso. Esta fuente de abastecimiento de agua cruda está aproximadamente a 1500 metros de la planta de tratamiento de agua potable, con 140 metros de profundidad, el cual suministra un caudal aprobado de 70 LPS (950GPM).

5.2.2. Dosis de coagulante

La dosis óptima de los coagulantes, cloro, floculante y cal para la potabilización y mejor tiempo de sedimentación se hicieron en pruebas de jarras una vez por semana.



Figura 5.1. Equipo para prueba de Jarras

Fuente: Elaboración propia

En la prueba de jarras se simulaban las operaciones de precloración, coagulación, floculación y sedimentación que se realizan en la planta de tratamiento de agua. La dosis óptima fue aquella que cumplió los parámetros de agua potable [7].

5.2.3. Prueba de demanda de cloro

Se tomaron 5 recipientes de vidrio y se adicionó a cada uno de ellos un volumen exacto de un litro de agua cruda. Posteriormente, se agregó a cada recipiente, un volumen de solución de cloro conocido, establecido previamente por el análisis de jarras, variando las proporciones de manera creciente de un recipiente al otro, en un 5%; se agitó y se midió la concentración de cloro residual en cada uno de los cinco ensayos realizados. Los resultados se compararon con el valor de concentración de cloro establecido inicialmente.

Ensayo No. 1

Previo lavado de los vasos de precipitados de un (1) litro y purgado con agua cruda fresca, se tomaron dos vasos y se adicionaron a cada uno exactamente un (1) litro de agua cruda (agua del pozo), ubicados debajo de cada paleta de agitación, se dio inicio a las pruebas, haciendo ensayos únicamente con dos jarras, una de las cuales correspondía a la jarra con la dosificación de reactivos empleada a en la planta y en la segunda jarra la dosis de cloro establecida por la prueba de demanda de cloro con las dosis de coagulante y floculante de la primera jarra.

La velocidad del agitador osciló entre 200 a 400 rpm. durante 5 segundos. Pasado este tiempo, se activó el cronómetro y se adicionaron de manera consecutiva a las dos jarras, el coagulante (el cual fue objeto de optimización), luego el cloro y finalmente el floculante. Se previno que el tiempo de dosificación fuera en condiciones simuladas en las dos pruebas. Después de un (1) minuto de agitación se adicionó la cal apagada y se llevó la velocidad de agitación a 40 rpm durante 10 min.

Los criterios registrados en la prueba fueron: tiempo que transcurrió antes de que se empezara a formar el floc, intensidad de la agitación sin fragmentarse, tiempo requerido para sedimentación completa, color y turbidez del sobrenadante, cloro residual, pH, sólidos totales disueltos y los parámetros correspondientes al hierro, la alcalinidad y la dureza.

5.2.4. Procedimientos de la Planta

Se llevó un control y seguimiento a todos los procedimientos que se realizaron en la planta y para ello se dispuso de registros para custodiar la información en formatos tanto escritos como computarizados.

Procedimiento de llenado y descarga del tanque de sedimentación

El llenado del tanque de sedimentación se realizó de manera simultánea con la adición de reactivos requeridos para el tratamiento del volumen de agua bombeado según la tabla de dosificación de químicos para la etapa de clarificación. El nivel de referencia para iniciar el llenado fue por debajo de 40 m³.

Se esperó el tiempo necesario para que el nivel del agua contenido en el tanque fuera el establecido para el llenado. Tan pronto el agua llegó al tanque de sedimentación, se accionaron las bombas dosificadoras de reactivos y se esperó hasta que el tanque se llenó completamente.

Tiempo de residencia

Se sacaron muestras del tanque sedimentador cada media hora después de haber terminado el llenado y allí se observó el proceso de sedimentación y se determinó el tiempo necesario para la sedimentación de lodos.

Drenado del tanque sedimentador

Antes de proceder a realizar el drenado del tanque de sedimentación, se verificó que el tiempo de residencia fuera el necesario para sedimentar los flocs formados durante el proceso de clarificación del agua. Se completó la hoja de Registro de Control de labores realizadas. Después de haber drenado el tanque sedimentador y haber evacuado los lodos sedimentados se hizo el proceso de filtración.

Retrolavado de filtros

Se aplicó éste procedimiento tanto para el filtro de arena, como para los filtros de arena y carbón. En el primero, se retrolavó cada vez que se sacaba un bache y el tiempo de retrolavado fue inferior a ocho

minutos. En el segundo, se efectuó el retrolavado de estos filtros una vez por día y el tiempo de retrolavado fue inferior a 10 minutos.

5.2.5. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Se realizaron los análisis fisicoquímicos que aparecen en la Tabla 5.1, como criterios de calidad del agua. La determinación de cloro libre, cloro total, alcalinidad, dureza total, se realizaron acordes a lineamientos procedimentales establecidos por los kit. El color real y aparente y la turbidez se realizaron según programas preestablecidos por el colorímetro HACH DR-890.

Tabla 5.1. Reactivos y equipos requeridos para los parámetros fisicoquímicos a analizar

<i>Parámetro</i>	<i>Equipos y reactivos</i>
Color	Colorímetro HACH DR-890
Turbidez	Colorímetro HACH DR-890
Hierro	Colorímetro HACH DR-890, Kit sobre de reactivo (Ferver Iron phenantroline)
Sólidos suspendidos	Colorímetro HACH DR-890, licuadora, cronómetro
pH	Equipo de pruebas Indicador rojo fenol
Dureza total	Kit de dureza total: indicador de negro de ericromo en solución alcohólica (reactivo 1) y valorante EDTA (reactivo 2).
Alcalinidad	Kit alcalinidad, indicador mixto de verde de bromocresol y metil naranja (reactivo 1) y valorante solución ácida (reactivo 2).
Cloro	Kit de cloro, equipo de pruebas, indicador de Ortotoloidina

Fuente: Elaboración propia

• *Determinación de pH y cloro residual*

Se realizó al agua tratada cada 30 minutos cuando hubo perturbaciones sobre el sistema; cada hora cuando se estableció la regularidad en la planta y cada hora y media cuando presentó estabilidad.

• ***Determinación de cloro libre***

Esta prueba se realizó según el punto en donde se tomó la muestra; primero se purgo el tubo tres veces con el agua que se analizó; al tubo lleno hasta el enrace se adicionaron cinco gotas del reactivo del kit cloro libre. Se tapó el tubo de prueba y se invirtió varias veces para mezclar, se comparó el tubo de prueba con la gama de colores que reporta el Kit con respecto al resultado de concentración.

• ***Determinación de cloro total***

Se procedió de igual forma que la determinación de cloro libre. Se esperó alrededor de tres minutos y se estableció como medición de cloro total el valor que corresponde a la misma coloración tanto para la muestra como para la escala reportada por el kit.

• ***Determinación de alcalinidad***

A la celda de análisis se adicionó agua hasta el enrace (5 mL). Se adicionaron 2 gotas de reactivo N° 1 (Indicador), la solución tomó una coloración verdosa; se adicionó gota a gota el reactivo N° 2 (Solución valorante) y se agitó constantemente hasta viraje de color a color rojo permanente. El indicador mixto de verde de bromocresol y metil naranja reaccionó con los carbonatos y bicarbonatos formando una coloración verdosa. La valoración se realizó con una solución de ácido sulfúrico. Se determinó la alcalinidad basados en la siguiente fórmula:

*Alcalinidad Total (ppm CaCO₃) = número gotas de reactivo 2 * 11.92*

• ***Determinación de dureza total***

Se enjuagó la celda de análisis con el agua a analizar, se adicionó agua hasta el enrace (5 mL), se adicionaron dos gotas de reactivo N° 1 (Indicador), la solución tomó una coloración verdosa; se adicionó gota a gota el reactivo N° 2 (Solución valorante) y se agitó constantemente hasta viraje de color a color azul permanente. Se determinó la dureza total con base en la siguiente fórmula:

*Dureza Total (ppm CaCO₃) = número gotas de reactivo 2 * 7.92*

• ***Determinación de sólidos suspendidos***

Se llenó una celda de muestra con 25 mL de agua destilada, se tomaron 500 mL del agua de análisis y se licuó un tiempo exacto de dos minutos. Se usó el programa de sólidos suspendidos en el colorímetro y se registró el valor correspondiente en el formato de Registro.

5.3. Resultados y discusión

Las condiciones de operación iniciales para el proceso de clarificación, atendiendo a variaciones en las dosis de las diferentes sustancias químicas que se añadían a la muestra en la planta de tratamiento se observan en la siguiente tabla, estos valores fueron los que se utilizaron como referencia.

Tabla 5.2. Concentraciones de referencia Prueba de Jarras (condiciones que labora la planta)

Reactivo	Concentración (ppm)	Solución
Hipoclorito de calcio, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$	500	5 g / 10 L
Sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	500	5g / 10 L
Floculante	50	0.5 g / 10 L

Fuente: Elaboración propia

Demanda de hipoclorito de calcio, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$

La concentración de cloro inicial que se aplicaba en el tanque de sedimentación en el proceso de clarificación del agua cruda, determinado con prueba de demanda de cloro era de 5g/10L de hipoclorito de calcio. El análisis de las pruebas de jarras, detallado en la Tabla 5.3 muestra los resultados para la demanda de hipoclorito de calcio, donde se establece la concentración de cloro y el cloro residual de cada prueba.

Tabla 5.3. Prueba de Jarras demanda de hipoclorito de calcio

Jarra	Concentración (ppm Cl ₂)	Cloro residual
1	8.95	1.0
2	10.44	1.3
3*	11.93	1.5
4	13.43	1.7

* Jarra Ideal

Fuente: Elaboración propia

Durante las pruebas se pudo determinar la necesidad de mantener una concentración mayor de hipoclorito de calcio en el proceso de clarificación, dado al comportamiento reductor que experimenta el cloro en presencia de iones ferrosos (Fe⁺²) de alta solubilidad que pueden ser oxidados a iones Fe⁺³ que presentan baja solubilidad a pH cercanos a las de agua de pozo objeto de estudio. Además, el cloro proporciona una acción desinfectante, por lo tanto, el residual de cloro después del proceso de clarificación debe ser de por lo menos 1.5 ppm; así, después de terminado el proceso de clarificación y filtración. Por esta razón, la jarra 3 fue la escogida como dosis óptima de hipoclorito de calcio para el proceso de clarificación.

La Tabla 5.4, muestra las características del agua de pozo objeto de tratamiento antes de realizar la prueba de jarras, posterior a la optimización de la demanda de cloro. Por lo general, el agua está constituida por un líquido de color intermedio, con turbidez y concentraciones de hierro que superan la norma.

Tabla 5.4. Características del agua de pozo antes de hacer pruebas de jarras

Parámetro	Jarra inicial*	Jarra ideal
pH	7.4	7.3
Hierro	1.80	1.97
Turbiedad	5	7
Color	20	15

*Jarra después de la optimización del cloro residual

Fuente: Elaboración propia

La siguiente tabla muestra la dosificación de reactivos a la prueba de jarra inicial e ideal, después de la optimización de la demanda de cloro que se mantuvo constante en 19.10 ppm. Se observa que en la prueba de jarras ideal se incrementó la dosificación del floculante, se disminuyó el sulfato de aluminio y se adicionó otro coagulante como es el hidroxiclورو de aluminio, se consideró la adición de cal.

Tabla 5.5. Dosificación de reactivos prueba de jarra inicial e ideal

Jarra	Dosificación de Reactivos									
	Cloro		Floculante		Coagulante A		Coagulante B		Cal	
	Vol. (mL)	Conc. (ppm)	Vol. (mL)	Conc. (ppm)	Vol. (mL)	Conc. (ppm)	Vol. (mL)	Conc. (ppm)	Conc. (ppm)	(g)
Inicial*	11.93	19.10	0.02	0.32	32.0	51.2				
Ideal	11.93	19.10	0.05	0.80	11.81	19.89	7.46	11.43	11.93	0.01

* Inicial según resultados de la jarra para demanda de cloro.

Coagulante A: Sulfato de aluminio

Coagulante B: Hidroxiclورو de aluminio

Fuente: Elaboración propia

Demanda de hidroxiclورو de aluminio, $Al(OH)_2Cl$

En la prueba de jarras realizada con las mismas dosificaciones iniciales de floculante y coagulante, que utilizaba la planta de tratamiento, y con variación de la demanda de cloro, se observó que la formación del floc requirió cuatro minutos, con tamaños muy pequeños, que incluso con tiempos de residencia superiores a 20 minutos no permitieron precipitarlos completamente, muchos de ellos quedaron en suspensión. Esta característica influyó en los parámetros fisicoquímicos que se encontraban por fuera de la normatividad (ver Tabla 5.6).

Con el fin de mejorar el desempeño del floculante en cuanto a la formación de flocs más grandes fácilmente asentables y que optimizara la sedimentación se hizo una combinación de coagulantes A y B (sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio), con el fin de reducir la concentración de metales pesados como el hierro. De igual forma, para que la neutralización química de las partículas y la posterior aglomeración del material coloidal y/o sólidos suspendidos, fuera más rápida. También se adicionó cal apagada la cual proporcionó mayor rapidez de precipitación, ya que ésta aumenta el tamaño de las partículas desestabilizadas y se precipitan más fácilmente. La dosificación de la jarras se encuentran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.6. Requisitos específicos para agua tratada y resultado de pruebas de jarras

Característica	Rango de aceptabilidad	Jarra inicial*	Jarra ideal
Dureza Total (ppm. CaCO ₃)	300 Máx.	105	94
Alcalinidad Total (ppm)	200 Máx.	135	135
pH	6.5 - 9.0	7.3	7.4
Cloro libre (ppm).	0.3 – 2.0	1.6	1.2
Hierro total (ppm).	0.3 Máx.	0.39	0.11
Conductividad (mW/cm)	50 - 1000	800	132
Turbiedad (UNT)	2	3	0
Color verdadero (UPC)	15	14	0
Olor y sabor	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Sólidos totales (mg/L)	< 500	512	84.5
Sustancias flotantes	Ausentes	Muchas	Ausentes

UPC: Unidades de Platino Cobalto. UNT: Unidades nefelométricas de turbidez.

* Jarra inicial después de optimizar la demanda de cloro.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos, después de los cambios en dosificación del floculante y coagulantes A y B, muestran la mejoría en el desempeño del proceso de clarificación evidenciados en la formación de floc's de tamaño considerable en sólo 40 segundos y en la disminución del tiempo en que tardó el proceso de sedimentación que fue de cinco minutos. Respecto a los parámetros fisicoquímicos analizados, se puede observar que la turbidez y el color se encuentran en cero, lo cual quiere decir que en el proceso de clarificación se sedimentaron la mayor parte de las partículas suspendidas y/o flotantes. Por otra parte, la concentración de hierro disminuyó en un 94.40 % permitiendo cumplir la norma y aunque el pH aumentó un poco por la adición de la cal, no es una cantidad muy significativa porque se conserva en el rango permitido. Los resultados de cloro residual

indican que hay una concentración considerable que garantiza su posterior acción desinfectante del agua.

Muestras respaldo

Las muestras respaldo se recolectaron diariamente para observar el comportamiento del agua después del proceso de potabilización. La Figura 2 indica el comportamiento de las muestras respaldo comprendido en los 24 meses de ensayo.

Entre los meses 1 a 5 las muestras recolectadas mostraban que los procesos de clarificación y de filtración no eran los adecuados, debido a que las muestras con sedimentación eran mucho mayores que las muestras que no presentaban sedimentación.

Las muestras respaldo se observan en la Figura 5.2.

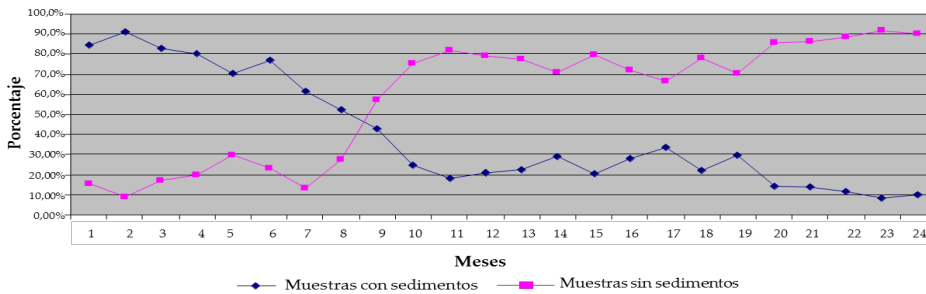


Figura 5.2. Muestras respaldo de 24 meses

Fuente: Elaboración propia

Después del mes nueve cuando se hace la implementación de la dosificación obtenida en el método de jarras se permitió intercambiar las tendencias donde las muestras sin sedimentación empiezan a marcar la diferencia.

Entre los meses 10 y 20 existen variaciones en los resultados, manteniéndose en promedio en el 80%, con los ajustes que se empezaron a hacer en los sistemas de filtración, en los meses 21 a 24 se observa un crecimiento el porcentaje de muestras sin sedimentos alcanzando total normalidad, los procedimientos están estandarizados y las dosificaciones son las óptimas para el proceso de clarificación del agua de pozo.

En general la Figura 2 muestra las tendencias en cuanto al comportamiento de las muestras respaldo, en donde los porcentajes iniciales de las muestras con sedimentación eran del 86.23 % y los porcentajes de las muestras sin sedimentación eran del 13.76 %, al final del proceso las muestras con sedimentación fueron de 9.95% y las sin sedimentación fueron del 90.04 % reduciendo al menos un 88.46 % de muestras sin sedimentación y cumpliendo plenamente los objetivos planteados.

Control de desperdicios

Los desperdicios de agua eran demasiado altos para los primeros seis meses de ensayo, debido a los procedimientos que se estaban llevando, principalmente por la mala clarificación del agua de pozo. A partir del décimo mes, fue un objetivo muy importante el poder disminuir los desperdicios a través de mejoras en los procedimientos y en las dosificaciones de reactivos. Después de los meses 17 a 24, donde se optimizaron las dosificaciones la tendencia de los desperdicios disminuyó en un 79.23%. En el segundo año, la planta de tratamiento acortó en 38.89 % los costos de los reactivos químicos respecto a los costos del primer año. Además, mejoró la aceptación por parte de los usuarios del producto hídrico suministrado.

5.4. Conclusiones

La sinergia entre las propiedades fisicoquímicas y las dosificaciones en la optimización procedimientos de la planta tales como el procedimiento de pruebas de jarras, de llenado y descarga del tanque sedimentador, preparación y dosificación de reactivos químicos, análisis fisicoquímicos de agua tratada entre otros, permitió ajustar en un 88.46% la calidad de agua de una planta de tratamiento de agua de pozo.

El mejoramiento de la dosificación de reactivos en los procedimientos de tratamiento del agua también realizó aportes significativo en la disminución de costos de operación en un 38.89% y en la disminución el impacto ambiental al bajar los desperdicios de agua de 13000 m³ a 2700 m³ por mes.

El poder entregar a usuarios humanos y al sector industrial valores fisicoquímicos que cumplen criterios normativos en calidad del agua muestran el aporte social de las investigaciones analíticas como una herramienta valiosa para el bienestar de las comunidades.

5.5. Referencias

- [1]. Aguilar, M.I Ortuño-Sandoval, J- F., Soler, A., Sáez, J. *Tratamiento físico químico de aguas residuales: coagulación y floculación*. España: EdiTum, 2012. Universidad de Murcia, 2002.
- [2]. Ministerio de Salud y Protección Social, Subdirección de Salud Ambiental. Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano INCA 2016. Bogotá. 2018. 392p
- [3]. Collazos, M.P., Montaña, J. *Manual de agua subterránea*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay, 2012.
- [4]. Yue, P., Chen, X., Liu, H., Jia. H. 2015. Study of startup parameters triggering water cresting in wells in bottom-water reservoirs. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 51, 3.
- [5]. Mihelcic, J. R. *Fundamentos de Ingeniería Ambiental*. New York: Limusa Wiley. 2012.
- [6]. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Evaluación regional del agua, Valle del Cauca. Santiago de Cali. 2017.
- [7]. Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Decreto Ley 4107 de 2011, Decreto 1077 de 2015, Resolución No.0549 de 2017
- [8]. Organización Panamericana de la Salud. Guías para la calidad del agua potable”, Vol 2, Washington, EUA. 2014
- [9]. Severiche, C.A.; Castillo, C.E.; Acevedo, R.L. *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros físico químicos básicos en aguas*. Cartagena Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net., 2013.
- [10]. Kemmer, F.N., McCallion, J, Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo 1. New York, McGraw-Hill. 2015.
- [11]. Restrepo, H.A. *Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable*.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas. 2012.

[12]. Schutte, F. *Handbook for the operation of water treatment works*. The water Utilisation Division Department of Chemical Engineering South Africa: University of Pretoria. 2006. pp 70-172.

[13]. Gitisa, V., Hankins, N. 2018 Water treatment chemicals: Trends and challenges *Journal of Water Process Engineering* 25, 34–38.

[14]. Collins, A.G. *Geochemistry of Oilfield Waters*, New York: Elsevier. 1975, 496 pp.

[15]. Al-Ghouti, M-A., Al-Kaabi, M-A., Ashfaq, M. Da'na, D. 2019. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering* 28, 222–239

[16]. Yusufu, D., Mills, A. 2018. Spectrophotometric and Digital Colour Colourimetric (DCC) analysis of colour-based indicators Sensors & Actuators: B. *Chemical* 273, 1187–1194

[17]. Miljojkovic, D., Trepšić, I., Milovancević, M. 2019 Assessment of physical and chemical indicators on water turbidity. *Physica A* 527, 121-171

[18]. Apha, A. *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Barcelona: Ediciones Díaz de Santos S.A. 2016.

[19]. Wang, A-Q., Lin, Y-L., Xu, B., Hu, Ch-Y., Gao, Z-Ch., Liu, Z., Cao, T-Ch., Gao, N-Y. 2018. Factors affecting the water odor caused by chloramines during drinking water disinfection *Science of the Total Environment* 639, 687–694

[20]. Ceinc Ltda. Instrumentación de proceso para análisis de agua. Hach Company. (2011).

[21]. Rodier, J. *Análisis del Agua*. Barcelona: Ediciones Omega. 9 ed. 2015. 1584p.

[22]. Vélez, M., Ortiz, C., Vargas, M-C. *Las aguas subterráneas. Un enfoque práctico*. Colombia: Ingeominas, 2010. 58p

[23]. Du, Y., Lv, X-T., Wu, Q-Y., Zhang, D-Y., Zhou, Y-T., Peng, L., Hu, H-Y. 2017. Formation and control of disinfection byproducts and toxicity during reclaimed water chlorination: A review. *Journal of Environmental Sciences* 58, 51 – 63

[24]. Shivcharan, V., Biraja, P., Mohanty, K.P., Singh, B.R., Behera, A-K. 2018. Dependence of precipitation of trace elements on pH in standard water Nuclear. *Inst, and Methods in Physics Research B*. 420, 18–22.

